



## 前主系列星の彩層活動と黒点・フレアによる光度変動の調査

山下 真依<sup>1</sup>, 伊藤 洋一<sup>1</sup>, 高木 悠平<sup>2</sup>, 大朝 由美子<sup>3</sup>  
<sup>1</sup> 兵庫県立大学, <sup>2</sup> 国立天文台ハワイ観測所, <sup>3</sup> 埼玉大学

2023年9月14日 なゆたユーザーズミーティング<sub>18</sub>



## 太陽型星の大気構造

- 光球
  - 我々が直接見ることのできる表面 (5000 Å で光学的厚み  $\tau = 1$ )
  - 吸収線が形成される
- 彩層
  - 太陽の半径 70 万 km に対し, 厚みは 1500 km の外層大気
  - 希薄な領域である
  - Ca II (Ca<sup>+</sup>) などの輝線が形成される

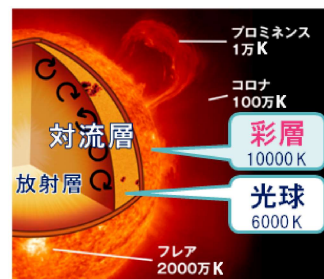


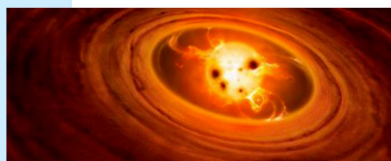
図 1: 太陽型星の大気構造 (ISAS/JAXA)

5/18

### 1 基本事項の共有

### 2 観測・解析・結果

### 3 考察



## 前主系列星の彩層活動と黒点・フレアによる光度変動の調査

山下 真依<sup>1</sup>, 伊藤洋一<sup>1</sup>, 高木悠平<sup>2</sup>, 大朝由美子<sup>3</sup>  
<sup>1</sup> 兵庫県立大学, <sup>2</sup> 国立天文台ハワイ観測所, <sup>3</sup> 埼玉大学

2023年9月14日 なゆたユーザーズミーティング<sub>18</sub>

3/18

## 若い太陽型星のダイナモ活動

- 前主系列星 (CTTS・WTTS) と零歳主系列星 (ZAMS)
  - 太陽のような主系列星よりも自転が速い (図 2) → 差動回転も速い
  - 対流の周期は長い (図 3) → 分厚い対流層を持つ

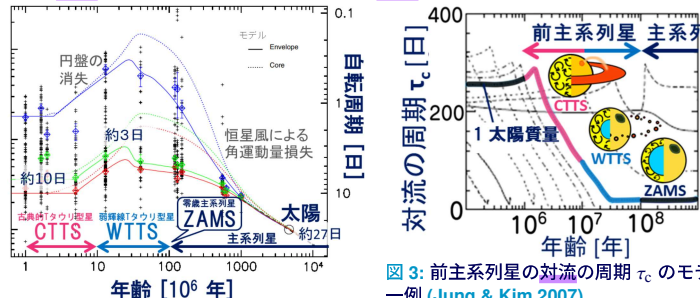


図 2: 太陽型星の自転周期の進化 (Gallet & Bouvier 2013)

図 3: 前主系列星の対流の周期  $\tau_c$  のモデルの一例 (Jung & Kim 2007)

ダイナモ活動の指標・ロスビー数 ( $\equiv \frac{\text{自転周期 } P}{\text{対流の周期 } \tau_c}$ ) が小さい。  
 → 活発な磁気活動が期待できる。

6/18

## 観測できる磁気活動3つとその2つの原因



4/18

## 星の巨大黒点とフレア

星は空間分解できないので, 測光観測により黒点やフレアの有無を確認する。

前主系列星 V410 Tau は  $\Delta V \sim 0.6$  mag という大きな変光を示したことから, 占有率  $\sim 29\%$  の巨大黒点の存在が示唆された (図 4)

- 巨大黒点による変光: sin カーブに近い準周期的な変光を示す
- フレアによる変光: 不規則に発生し, 急激な増光と緩やかな減光を示す

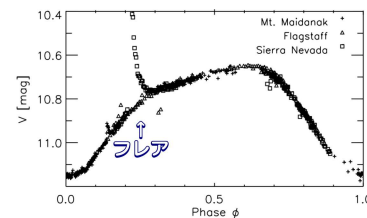


図 4: 地上観測で捉えられた, 前主系列星での黒点とフレアによる変光 (Stelzer et al. 2003)

測光精度 (11 等級の場合)

地上観測では  $\pm 10^{-2}$  mag → TESS 衛星では  $\pm 3 \times 10^{-4}$  mag へ!

### 目的

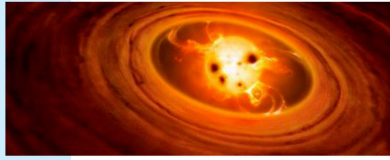
前主系列星は年齢ごとに自転や対流がダイナミックに変化するが, 磁気活動性との関係はいかがだろうか? TESS 衛星のデータを測光し, 巨大黒点, 大規模なフレアについて統計的な解析を目指す。

7/18

1 基本事項の共有

2 観測・解析・結果

3 考察



前主系列星の彩層活動と黒点・フレアによる光度変動の調査



山下 真依<sup>1</sup>, 伊藤洋一<sup>1</sup>, 高木悠平<sup>2</sup>, 大朝由美子<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>兵庫県立大学, <sup>2</sup>国立天文台ハワイ観測所, <sup>3</sup>埼玉大学

2023年9月14日 なゆたユーザーズミーティング

解析とその結果: フレアの検出

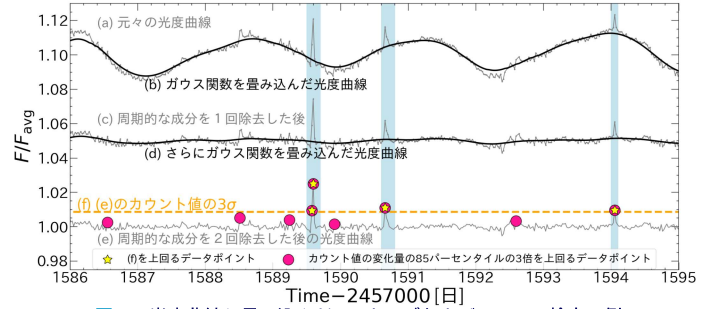


図 10: 光度曲線と畳み込んだ sin カーブおよびフレアの検出の例

周期的な成分の除去後, 以下の2つの基準を満たす増光をフレアとして検出した.

- ★ 高さの基準: カウント値の  $3\sigma$  を1回でも上回る
- 急激な増光の基準: カウント値の変化量の85パーセンタイルの3倍を上回る

- 前主系列星 42 天体から 120 発のフレアが検出された
- 他の天体でのフレアと同じく, 急激な増光と緩やかな減光を見せた

ターゲット

1 前主系列星 42 天体

- 質量  $0.8 - 1.2 M_{\odot}$
- 年齢ごとに3グループに分けた.
  - 0.1 - 10 Myr: 10 天体
  - 10 - 30 Myr: 20 天体
  - 30 - 50 Myr: 12 天体

2 零歳主系列星 121 天体

(年齢 ~ 100 Myr)

3 太陽型主系列星 (Notsu et al. 2015, Okamoto et al. 2021)

4 太陽 (年齢 ~ 4.6 Gyr) (Notsu et al. 2015)

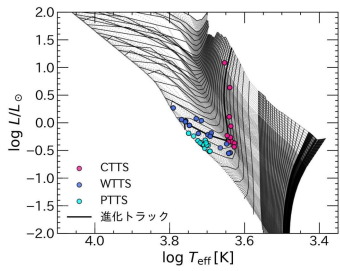
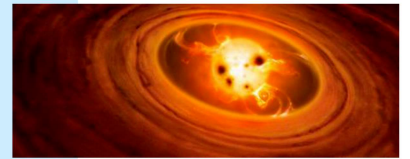


図 5: ターゲット天体の HR 図で, 横軸が有効温度, 縦軸が光度である. 実線が進化トラック, 点線が等時曲線を示す. Jung & Kim (2007) の進化トラックを元々の 10 分の 1 に線形補間し, ターゲットの質量と年齢を推定した.

1 基本事項の共有

2 観測・解析・結果

3 考察



前主系列星の彩層活動と黒点・フレアによる光度変動の調査



山下 真依<sup>1</sup>, 伊藤洋一<sup>1</sup>, 高木悠平<sup>2</sup>, 大朝由美子<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>兵庫県立大学, <sup>2</sup>国立天文台ハワイ観測所, <sup>3</sup>埼玉大学

2023年9月14日 なゆたユーザーズミーティング

光度曲線の形状

■測光

TESS 衛星により時間分解能 120 s で取得された画像を測光した. 光度曲線の振幅 (上下 10% は除く) と, Lomb-Scargle ピリオドグラムにより周期を測定した.

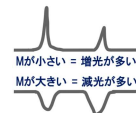
■光度曲線の形状の分類

Cody et al. (2014) で定義された

Q 周期性のパラメータ

M 増減光のパラメータ

を測定し, 6 グループに分類した.



今後は主に, 天体数が多かった以下の3グループを議論する.

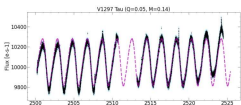


図 7: 高周期的な天体

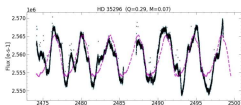


図 8: 準周期的な天体

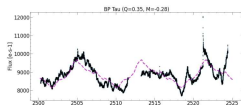


図 9: バースト天体

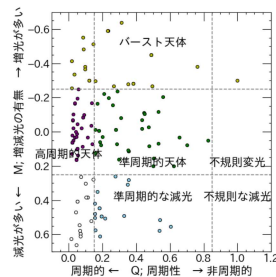


図 6: 光度曲線の形状の分類

考察 1: 自転周期の進化

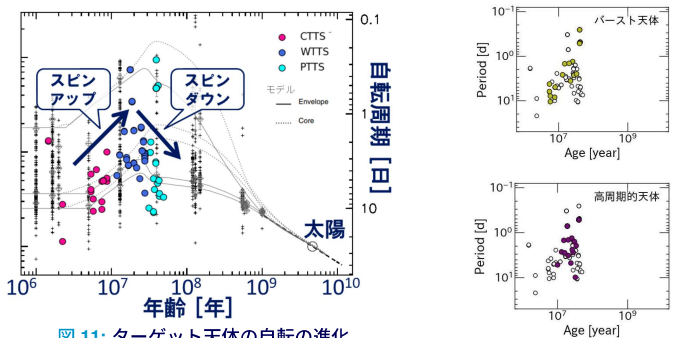


図 11: ターゲット天体の自転の進化

表 1: グループごとの特徴

	自転周期	対流の周期
バースト天体	スピニアップ中	比較的長い
高周期的な天体	速め	比較的短い (< 100 日)

## 考察2: 若い太陽型星には巨大黒点がある

光度曲線の振幅 → 黒点占有率  $A_{\text{spot}}/A_{\text{star}}$

$$A_{\text{spot}}/A_{\text{star}} = \frac{\Delta F}{F} \left[ 1 - \left( \frac{T_{\text{spot}}}{T_{\text{star}}} \right)^4 \right]^{-1} \quad (1)$$

A: 放射面積,  $\frac{\Delta F}{F}$ : 規格化した光度の振幅, T: 温度,  $T_{\text{spot}}$  と  $T_{\text{star}}$  の温度差は経験的に求めた (Berdyugina et al. 2005).

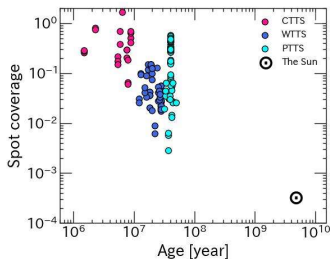


図 12: 年齢 vs 黒点占有率

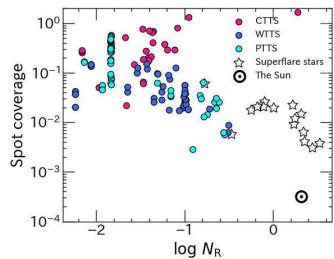


図 13: ロスピー数 (= 自転周期/対流の周期) vs 黒点占有率

- 若いほど黒点占有率が大きい傾向あり
- 自転が速い, または対流が遅いほど黒点占有率が大きい傾向あり

14/18

## 考察5: 活発なフレア

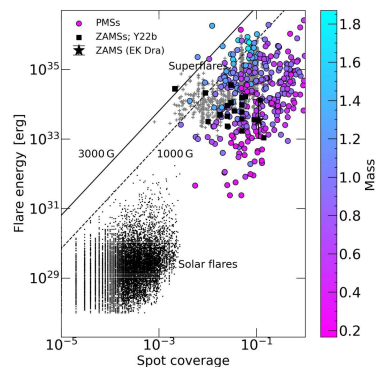


図 20: 黒点占有率 vs フレアのエネルギー (一部 Yamashita et al. 2022b, S13, O21 より). この図だけ太陽型星以外も含み, 計 160 天体を測定してプロットした.

- エネルギーは  $\sim 10^{33} - 10^{35}$  erg でスーパーフレアに匹敵する
- 質量依存性も見えた
- 若いほど高エネルギーのフレアを示した

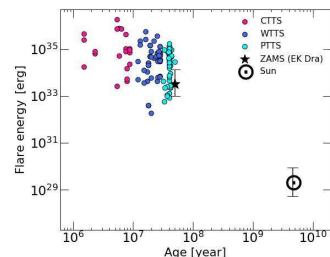


図 21: 年齢 vs フレアのエネルギー

17/18

## 考察3: 前主系列星の彩層活動

横軸: ロスピー数  $N_R \equiv \frac{\text{自転周期 } P}{\text{モデルから推定した対流の周期 } \tau_c}$

縦軸: 全放射強度に対する Ca II 輝線の強度  $R' \equiv \frac{\text{輝線の等価幅から求めた放射流束 } F'}{\sigma T_{\text{eff}}^4}$

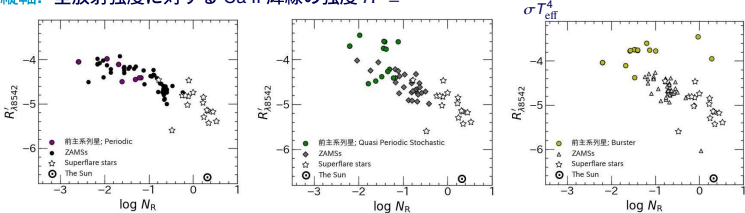


図 14: 高周期的天体

図 15: 準周期的天体

図 16: バースト天体

図 14 零歳主系列星が示す輝線強度の最大値と同等程度である

→ この天体たちはスピナップが終わる頃だが, もう質量降着はなさそうだし, 活発な彩層を持つと言える

図 16 同じロスピー数の零歳主系列星と比べても, 輝線強度が大きい天体が多い

→ スピナップ中の天体には, まだ質量降着がありそう

15/18

## 前主系列星の彩層活動と黒点・フレア

兵庫県立大学 D3 山下真依 (yamashita@nhao.jp)

**Context.** 前主系列星は表面磁場が強く, 巨大な黒点や明るい彩層輝線が生じると言われている

**Aims.** 連続光の光度の変動と彩層輝線の強度より, 前主系列星のダイナモ活動について考察する

**Methods.** 前主系列星 42 天体に対して, TESS データから光度の振幅を測定し, 彩層輝線の強度との関係を調査した

**Discussion.** ロスピー数が小さい前主系列星ほど, 大きな黒点・強い彩層輝線を示した. 若い前主系列星ほど大きな黒点・高エネルギーのフレアを示した.

**Conclusion.** 巨大黒点・強い彩層輝線・高エネルギーのフレアを示すような大規模な磁気活動が, 前主系列段階から続いている.

See you again !!

18/18

## 考察4: 黒点と彩層輝線には正の相関あり

横軸: 光度曲線の振幅 (= 黒点サイズ)

縦軸: 全放射強度に対する Ca II 輝線の強度  $R' \equiv \frac{\text{輝線の等価幅から求めた放射流束 } F'}{\sigma T_{\text{eff}}^4}$

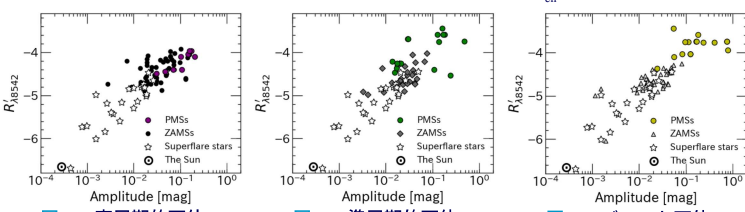


図 17: 高周期的天体

図 18: 準周期的天体

図 19: バースト天体

前主系列星は太陽型星の延長線上に位置する

図 17 太陽よりも, 光度変動の振幅も輝線強度  $R'$  も 2 桁大きい

→ 巨大黒点と活発な彩層を持つような, 大規模な磁気活動が前主系列段階から続いている

図 19 半数以上の前主系列星は, 主系列星よりも光度変動と輝線強度が大きい

→ グラフ右上や上にある前主系列星は, 円盤による掩蔽や質量降着が原因の不規則変光と思われる

16/18

## Reference

noframenumbering

Berdyugina, S. V. 2005, Living Rev Sol Phys, 2, 1

Gallet, F., & Bouvier, J. 2015, A&A, 577, 1

Frasca, A., Biazzo, K., Alcalá, J. M., et al. 2017, A&A, 602, 33

Hamann, F., & Persson, S. E. 1992, ApJS, 82, 247

Jung, Y. K., & Kim, Y.-C. 2007, J. Astron. Space Sci., 24, 1

Landin, N. R., Mendes, L. T. S., & Vaz, L. P. R. 2010, A&A, 510, 1

Marsden, S. C., Carter, B. D., & Donati, J.-F. 2009, MNRAS, 399, 888

Notsu, Y., Honda, S., Maehara, H., et al. 2015, PASJ, 67, 1

Noyes, R. W., Hamann, F. W., Baliunas, S. L., & Vaughan, A. H. 1984, AJ, 279, 763

Okamoto, S., Notsu, Y., Maehara, H., et al. 2021, AJ, 906, 72

Shibayama, T., Maehara, H., Notsu, S., et al. 2013, ApJS, 209, 5

Stelzer, B., Fernandez, M., Costa, V. M., et al. 2003, A&A, 411, 517

Vernazza, J. E., Avrett, E. H., & Loeser, R. 1981, ApJS, 45, 635

Yamashita, M., Itoh, Y., & Takagi, Y. 2020, PASJ, 72, 80

Yamashita, M., & Itoh, Y. 2022a, PASJ, 74, 557

Yamashita, M., Itoh, Y., & Oasa, Y. 2022b, PASJ, 74, 1295

18/18